

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ СИММЕТРИИ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

INFLUENCE OF INTERPLANETARY PARAMETERS ON THE DEGREE OF SYMMETRY OF THE RING CURRENT

Г.А. Макаров Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru

G.A. Makarov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. В работе исследуется влияние межпланетных факторов на степень симметрии магнитосферного кольцевого тока. Рассматриваются геомагнитные индексы $SYM-H$, $ASY-H$ и межпланетные параметры за период 1981–2015 гг. Показателем степени симметрии кольцевого тока является отношение $SYM-H/ASY-H$. Анализ проводится по среднегодовым значениям геомагнитных и межпланетных параметров. Такой подход позволяет выделить крупномасштабные закономерности. Была рассмотрена связь показателя степени симметрии кольцевого тока и индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ с величиной B межпланетного магнитного поля (ММП), северо-южной компонентой B_n ММП и скоростью V солнечного ветра. Был сделан вывод, что свойства магнитосферных кольцевых токов отражаются этими индексами более адекватно при учете смещений их значений, чем без учета смещений. Получено, что при учете смещения значений $ASY-H$ симметричный кольцевой ток примерно в два раза превалирует над асимметричным для средних условий в солнечном ветре: $V < 550$ км/с, $B < 10$ нТл, $|B_n| < 2$ нТл. При спокойном состоянии солнечного ветра ($V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл) показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается. Установлено, что при увеличении абсолютных значений межпланетных параметров V , B , B_n индекс симметричного кольцевого тока $SYM-H$ растет сильнее, чем индекс асимметричного кольцевого тока $ASY-H$.

Ключевые слова: геомагнитные индексы $SYM-H$ и $ASY-H$, магнитосферный кольцевой ток, межпланетные параметры.

Abstract. The paper studies the influence of interplanetary factors on the degree of symmetry of the magnetospheric ring current. The geomagnetic indices $SYM-H$, $ASY-H$, and interplanetary parameters for the period 1981–2015 are considered. The indicator of the degree of symmetry of the ring current is the ratio $SYM-H/ASY-H$. Analysis is based on annual averages of geomagnetic and interplanetary parameters. This approach allows us to identify large-scale patterns. The relationships are examined of the degree of symmetry of the ring current and the indices $SYM-H$ and $ASY-H$ with the value B of the interplanetary magnetic field (IMF), the IMF north-south component B_n , and the solar wind velocity V . It is concluded that properties of magnetospheric ring currents are described by these indices more adequately when offsets in their values are taken into account than without regard for them. It is found that when offsets in $ASY-H$ are considered the symmetric ring current prevails approximately twice over the asymmetric one for average conditions in the solar wind: $V < 550$ km/s, $B < 10$ nT, $|B_n| < 2$ nT. Under quiet solar wind conditions ($V < 450$ km/s, $B < 5.5$ nT, $|B_n| < 0.7$ nT), the degree of symmetry of the ring current increases. It is established that with intensification of interplanetary parameters (V , B , $|B_n|$) the symmetric ring current index $SYM-H$ grows more strongly than the asymmetric ring current index $ASY-H$.

Keywords: geomagnetic indices $SYM-H$ and $ASY-H$, magnetospheric ring current, interplanetary parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосферный кольцевой ток состоит из двух основных частей: симметричной и асимметричной. Для оценки симметричной и асимметричной частей кольцевого тока были разработаны геомагнитные индексы SYM и ASY соответственно [Iyemori et al., 1992].

Исследованию влияния межпланетных параметров на индексы SYM и ASY посвящено достаточно много работ. В [Shi et al., 2006] обнаружено, что при отрицательной северо-южной компоненте B_n межпланетного магнитного поля (ММП) повышение динамического давления солнечного ветра (СВ) до-

полнительно увеличивает асимметрию кольцевого тока. В [Singh et al., 2013] исследовано влияние на $ASY-H$ и $ASY-D$ плавных и резких изменений B_n ММП во время магнитных суббурь. В [Haiducek et al., 2017] на основе системы SWMF смоделирован прогноз геомагнитных индексов K_p , $SYM-H$, AL и обнаружено, что модель отлично справляется с предсказанием $SYM-H$. В [Bhaskar, Vichare, 2019] с использованием искусственной нейронной сети реализован успешный прогноз $SYM-H$ и $ASY-H$ во время девяти геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла; в качестве входных данных использовались скорость и плотность СВ, а также B , B_y , B_z ММП. На главной

фазе сильных бурь отмечаются заметные отклонения спрогнозированных значений индексов от наблюдавшихся, что указывает на влияние внутренних факторов, таких как магнитосферные процессы. В статье [Макаров, 2022] на большом статистическом материале рассмотрены связи *SYM-H* и *ASY-H* с ключевыми межпланетными параметрами и получено, что зависимость *ASY-H* и *SYM-H* от северо-южной компоненты ММП определяется величиной ММП. Кроме того, установлена зависимость *SYM-H* и *ASY-H* от плазменного параметра β СВ: их абсолютные величины уменьшаются с ростом β независимо от знака B_n ММП [Макаров, 2024]. Предполагается, что это обусловлено переходом магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в СВ теплового давления над магнитным и уменьшения уровня турбулентности.

Корреляционные связи *ASY-H*-индекса с параметрами межпланетной среды для 107 магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл, индуцированных разными типами течений СВ (CIR — короткими высокоскоростными потоками и ICME — межпланетными выбросами корональной массы), исследованы в работе [Бороев, Васильев, 2020] и получено, что среднее значение *ASY-H* на главной фазе магнитной бури зависит от электрического поля и южной компоненты ММП независимо от типа течения, при этом связь между *ASY-H* и скоростью СВ не обнаружена. В [Namiun et al., 2023] рассмотрены корреляционные связи между индексом *SYM-H* и различными межпланетными параметрами для 131 магнитной бури, обусловленной CME, и 161 магнитной бури, вызванной CIR. В этой работе сделаны выводы, что индекс *SYM-H* в случае CME-бурь имеет более сильную зависимость от скорости СВ и конвективного электрического поля, а в случае CIR-бурь сильнее зависит от электрического поля СВ, скорости открытого магнитного потока $d\phi/dt$ и электрического поля пересоединения E_{KL} .

Симметричный и асимметричный кольцевые токи обладают разными свойствами [Бахмина, Калегаев, 2008]. Симметричный кольцевой ток образуется из-за раздельного движения захваченных геомагнитным полем протонов и электронов магнитосферной плазмы вдоль замкнутых траекторий вокруг Земли и существует постоянно. Частичный кольцевой ток формируется в ночном и вечернем секторах вблизи геомагнитного экватора вследствие усиления магнитосферной конвекции во время возмущений. Считается, что частичный кольцевой ток развивается на главной фазе магнитной бури и распадается сразу после ее максимума [Бархатов и др., 2008]. Хотя слабая долготная асимметрия магнитосферного магнитного поля, измеряемого на поверхности Земли, присутствует и в геомагнитно-спокойные периоды, достоверно не известно, связана ли она с существованием частичного кольцевого тока в спокойной магнитосфере [Калегаев и др., 2008].

В работе [Weygand, McPherron, 2006] рассмотрена такая характеристика кольцевых токов, как степень симметрии, определенная как отношение *SYM-H*/*ASY-H*. Они получили, что кольцевой ток всегда асимметричен. Изучая вариации индексов

SYM и *ASY*, авторы работ [Weygand, McPherron, 2006; Iyemori et al., 2010] выявили, что в их значениях наблюдаются смещения. Согласно определению, данному в этих работах, смещение — это ненулевое значение индекса при магнитно-спокойных условиях. В [Weygand, McPherron, 2006] было предположено, что смещения могут вызываться совместным влиянием различных магнитосферных токовых систем. Ранее в работах [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Tsyganenko, Sitnov, 2005] было показано, что вклад в геомагнитные характеристики кольцевого тока дают не только сам кольцевой ток, но и токи магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольные токи.

Большинство работ, посвященных исследованию связи индексов кольцевого тока *SYM* и *ASY* с межпланетными параметрами, выполнено для буревых и суббуревых условий. Изучение солнечно-земных связей и проявлений космической погоды будет неполным без учета крупномасштабных свойств кольцевого тока и его долговременной динамики. Такие свойства можно исследовать, анализируя данные с временным разрешением сутки и более. Подобного рода исследования часто ведутся статистическими методами с использованием среднесуточных и среднегодовых значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном усреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться. В этой связи представляется важным исследовать изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов *SYM* и *ASY*, полученных по среднесуточным данным. Целью работы является рассмотрение влияния межпланетных параметров на показатель степени симметрии магнитосферного кольцевого тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Индексы *SYM* и *ASY* рассчитываются по *H*- и *D*-составляющим геомагнитного поля на шести среднеширотных станциях (сеть состоит из более чем десяти станций). Эти индексы имеют одномоментное временное разрешение и подразделяются на *SYM-H*, *SYM-D*, *ASY-H* и *ASY-D*. *SYM-H* и *SYM-D* представляют собой, по сути, усредненные отклонения *H*- и *D*-составляющих геомагнитного поля от спокойного уровня на станциях наблюдения с поправкой на геомагнитную широту, в то время как *ASY-H* и *ASY-D* определяются как разности между максимальными и минимальными значениями *H*- и *D*-составляющих после вычета из поля возмущения соответствующих симметричных частей. Индекс *SYM-H*, как правило, имеет отрицательные значения (подобно индексу *Dst*), *SYM-D* принимает значения обоих знаков, а *ASY-H* и *ASY-D* всегда положительны. Подробно методика определения индексов *SYM* и *ASY* приведена в работе [Iyemori et al., 2010].

Анализ данных проводится по среднегодовым значениям индексов *SYM-H* и *ASY-H* и межпланетных параметров за 1981–2015 гг. Геомагнитные индексы

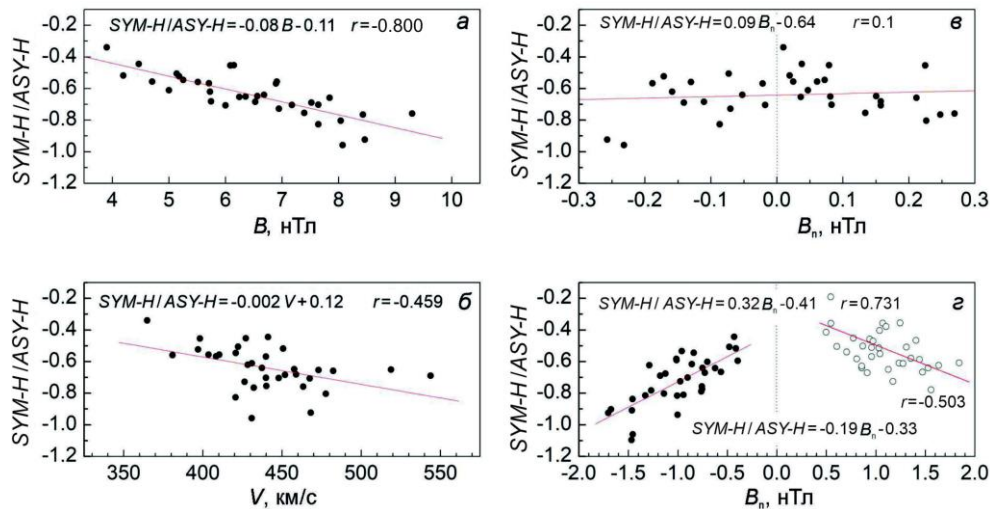


Рис. 1. Зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП (а), скорости солнечного ветра V (б) и северо-южной компоненты B_n ММП без разбивки (в) и с разбивкой (г) данных по знаку B_n ; на панелях приведены уравнения линейной регрессии и коэффициенты корреляции r

взяты с сайта Мирового центра данных по геомагнетизму [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>], межпланетные данные — с сайта Центра данных космической физики НАСА [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. Компоненты ММП в этой базе данных представлены в системе координат RTN: ось R направлена радиально от Солнца, ось T имеет направление в сторону вращения Солнца, а ось N представляет собой векторное произведение осей R и T. На нулевой гелиографической широте оси N и солнечного вращения параллельны. Системы координат RTN и GSE на околоземных расстояниях различаются противоположными направлениями осей R и X, а также T и Y соответственно.

После исключения дней с отсутствием сведений о межпланетных и геомагнитных параметрах в массиве данных осталось 10759 дней. При рассмотрении связи индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ с северо-южной компонентой B_n ММП данные разбивались по знаку B_n : дней с $B_n \leq 0$ было 5670 (в том числе 118 дней, когда среднесуточные значения B_n были равны нулю), дней с $B_n > 0$ — 5089.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП, скорости V СВ и северо-южной компоненты B_n ММП (в). По графикам получены соответствующие уравнения линейной регрессии и определены коэффициенты корреляции r . Видно, что показатель степени симметрии зависит от B и V , при этом коэффициент корреляции между $SYM-H/ASY-H$ и B ММП равен 0.8, а между $SYM-H/ASY-H$ и V не превышает 0.5. Что касается связи $SYM-H/ASY-H$ с B_n ММП, то при рассмотрении данных без учета знака северо-южной компоненты ММП (панель (в)) она отсутствует: $r = 0.1$. Поскольку северо-южная компонента ММП является одним из основных факторов, влияющих на магнитосферные процессы, то данные об индексах были разбиты на два подмассива в соответствии со знаком B_n . На панели

(г) приведены связи показателя степени симметрии $SYM-H/ASY-H$ и B_n отдельно при южном и северном направлениях ММП. Видно, что связь выраженная: при $B_n \leq 0$ $r = 0.73$, при $B_n > 0$ $r = 0.50$. Можно сказать, что с ростом абсолютных значений межпланетных параметров значение $SYM-H/ASY-H$ увеличивается по абсолютной величине и приближается к 1.

$SYM-H/ASY-H = -1$ означает, что симметричная и асимметричная части кольцевого тока сравниваются при максимальных величинах межпланетных параметров. Получается, что асимметричный ток большую часть времени преобладает над симметричным, однако так быть не может. При крупномасштабных усреднениях логично предполагать, что симметричная часть кольцевого тока должна доминировать над асимметричной вследствие того, что в отсутствие геомагнитных возмущений симметричный кольцевой ток присутствует в магнитосфере постоянно [Калегаев и др., 2008]. Такой ток медленно распадается на восстановительной фазе геомагнитной бури, которая может длиться достаточно долго [Weygand, McPherron, 2006], тогда как асимметричный кольцевой ток развивается на главной фазе геомагнитной бури и время его распада значительно короче [Weygand, McPherron, 2006; Бахмина, Калегаев, 2008].

Во Введении говорилось о смещениях значений SYM и ASY . В работе [Weygand, McPherron, 2006] было предположено, что смещение значений $SYM-H$, вероятно, возникает вследствие комбинации трех эффектов: токов Чепмена—Ферраро в спокойное время; кольцевого тока в спокойное время и разницы между эффектом хвоста в спокойные и буревые дни, тогда как смещение значений $ASY-H$ обуславливается комбинацией двух эффектов: асимметричного кольцевого тока, который всегда присутствует во внутренней магнитосфере, и шума на графиках местного времени, вызванного неполным вычитанием вариации спокойного дня на каждой станции.

Наличие смещения в значениях Dst было установлено в работах [Takalo, Mursula, 2001; Hakkinen

et al., [2003]. Takalo, Mursula [2001] исследовали изменяющиеся в зависимости от сезона суточные вариации *Dst*-индекса по спокойным и всем дням и обнаружили, что эти изменения связаны с неравномерным распределением станций сети *Dst*. Анализ суточных и сезонных изменений *Dst* позволил Hakkinen et al. [2003] сделать вывод, что станции сети *Dst* имели разные базовые уровни, так что средние значения *Dst* различались на 10 нТл. В работе [Макаров, 2020] показано, что вследствие неравномерности сети станций, участвующих в определении *Dst*-индекса, образуется годовая вариация *Dst*.

В работе [Weygand, McPherron, 2006] в индекс *SYM-H* была введена поправка на вклад в него динамического давления СВ и было оценено при статистическом исследовании по времени бурь, что смещение в индексах *SYM-H* и *ASY* составляет около 18 ± 2 нТл в зависимости от используемого метода. Zhao et al. [2022], исследовав связи очень больших геомагнитных бурь ($\Delta SYM-H < -200$ нТл) с параметрами СВ, пришли к выводу, что эмпирические формулы, используемые в такого рода работах, оценивают интенсивности бурь с большими статистическими ошибками. В статье [Макаров, 2021] по данным о сезонных вариациях индексов, а также по результатам регрессионного анализа среднегодовых значений индексов и уровня магнитной активности за 1981–2016 гг. были установлены величины смещений для *SYM-H* –0.1 нТл и для *ASY-H* 13.6 нТл. В настоящей работе сложность представляет учет смещения при статистическом исследовании вклада разных источников в индексы *SYM-H* и *ASY-H*.

Учитывая важность смещений рассматриваемых индексов, повторим оценки связи показателя степени симметрии кольцевого тока с межпланетными параметрами, используя величины смещений, полученные в [Макаров, 2021] по результатам статистического исследования. Смещение в значениях *SYM-H* мизерно, поэтому им можно пренебречь, а в значениях *ASY-H* оно значимо. После введения поправки 13.6 нТл в значения *ASY-H* были рассчитаны показатели симметрии *SYM-H/ASY-H*, результаты представлены на рис. 2.

При сравнении рис. 2 с рис. 1 видно, что, во-первых, связь между *SYM-H/ASY-H* и межпланетными параметрами практически отсутствует, за исключением слабой связи между показателем симметрии и северо-южной компонентой ММП, когда данные были разбиты по знаку B_n (э); и, во-вторых, средние значения *SYM-H/ASY-H* варьируют около –2. Такое поведение показателя симметрии может свидетельствовать о преобладании симметричного кольцевого тока над асимметричным при оперировании среднегодовыми данными. Действительно, симметричный кольцевой ток существует постоянно, в то время как частичный кольцевой ток развивается на главной фазе магнитной бури и распадается сразу после ее максимума. Кольцевой ток становится симметричным на фазе восстановления [Калегаев и др., 2008]. Поскольку фаза восстановления бури значительно продолжительнее (примерно в три и более раза), чем главная фаза, симметричный кольцевой ток сохраняется большее время и при суточном

усреднении дает вклад в геомагнитные изменения, превышающий вклад асимметричного кольцевого тока на главной фазе, когда интенсивность этого тока значительно выше. Известно [Weygand, McPherron, 2006], например, что постоянные времени для *SYM-H* (5.25 и 64.3 ч) почти вдвое больше, чем для *ASY-H* (2.2 и 20.9 ч).

На рис. 2, а, б, в можно заметить три точки, когда $|SYM-H/ASY-H| > 4$, они соответствуют малым значениям B , V и $B_n > 0$, т. е. случаям, когда частичный кольцевой ток минимален. Выпадающая точка с положительным значением показателя симметрии соответствует положительному значению *SYM-H*. Панель (э) достаточно наглядно демонстрирует нелинейную связь *SYM-H/ASY-H* с B_n , в соответствии с которой симметричный кольцевой ток заметно превалирует над асимметричным при малых значениях B_n . Можно заметить, что показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается, когда $V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл. Такие закономерности ожидаемы из-за разных свойств симметричного и асимметричного токов. Таким образом, при учете смещения индекс *ASY-H* более адекватно отражает свойства магнитосферных кольцевых токов, чем без учета смещения. Смещения индексов обуславливаются вкладами всех основных магнитосферных токовых систем.

На рис. 3 показаны корреляционные связи индексов *ASY-H* и *SYM-H* с межпланетными параметрами. При рассмотрении связи с B_n данные были разбиты на два подмассива: $B_n \leq 0$ и $B_n > 0$, в остальных случаях знак B_n не учитывался. Представленные на рисунке зависимости согласуются с известными — геомагнитные индексы возрастают по абсолютной величине с увеличением B , V и $|B_n|$. Следует обратить внимание на коэффициенты линейной регрессии: во всех уравнениях связи с межпланетными параметрами коэффициенты для индекса *SYM-H* больше, чем для индекса *ASY-H*, причем значения обоих индексов сопоставимы. Это означает, что *SYM-H* увеличивается по мере роста абсолютных значений параметров СВ сильнее, чем *ASY-H*: в 1.37 в случае B , в 1.33 в случае V , в 1.5 в случае при $B_n \leq 0$ и в 1.08 при $B_n > 0$. В настоящей работе рассматриваются среднегодовые данные. При таком усреднении данных буревые и суббуревые процессы сглаживаются, кроме того, надо учесть временные масштабы частоты кольцевого тока — они больше у симметричной составляющей [Weygand, McPherron, 2006]. Отмеченное свойство *SYM-H*, вероятно, также вносит дополнительный вклад в связи показателя симметрии *SYM-H/ASY-H* с межпланетными параметрами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показано, что геомагнитный индекс *ASY-H* более правильно отражает свойства магнитосферных кольцевых токов при учете смещения его значений, чем при игнорировании этого смещения. При учете смещения значений *ASY-H* симметричная составляющая кольцевого тока примерно в два раза превалирует над асимметричной для средних условий в солнечном ветре: скорость $V < 550$ км/с, величина межпланетного магнитного поля $B < 10$ нТл, северо-южная

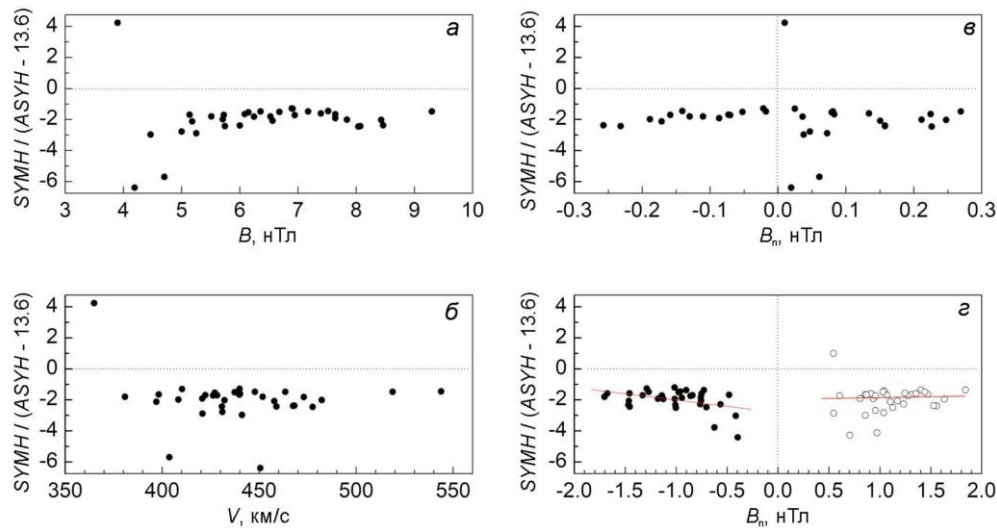


Рис. 2. Зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП (a), скорости солнечного ветра V ($б$) и северо-южной компоненты B_n ММП (без разбивки ($в$) и с разбивкой ($г$) данных по знаку B_n) после учета смещения значений $ASY-H$

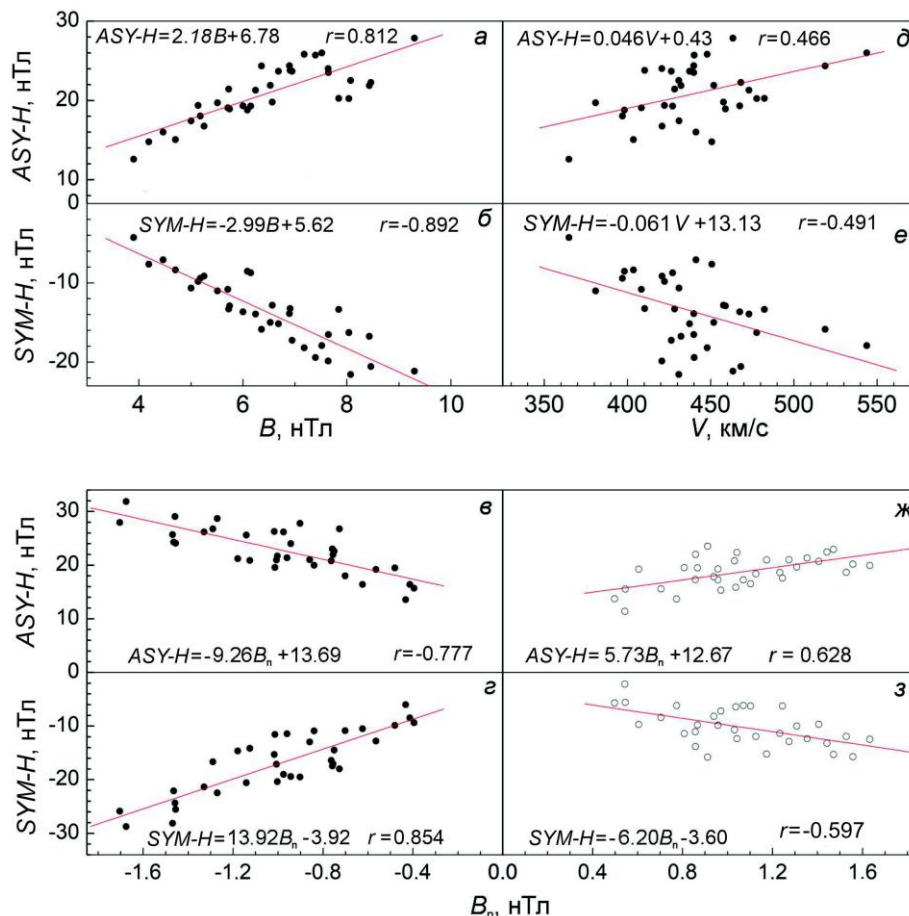


Рис. 3. Зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от B ММП (a и $б$ соответственно), скорости солнечного ветра V ($д$ и $е$), северо-южной компоненты B_n ММП ($в, г, ж, з$; данные разбиты по знаку B_n); на панелях приведены уравнения линейной регрессии и коэффициенты корреляции r

компонента межпланетного магнитного поля $|B_n| < 2$ нТл. При спокойном состоянии солнечного ветра ($V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл) показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается.

По среднегодовым значениям $SYM-H$ и $ASY-H$ установлено, что при увеличении абсолютных зна-

чений межпланетных параметров (скорости солнечного ветра, величины межпланетного магнитного поля, северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля) индекс симметричного кольцевого тока $SYM-H$ растет сильнее, чем индекс асимметричного кольцевого тока $ASY-H$.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный SYM и асимметричный ASY кольцевой ток, с индексами активности авроральных электроструй AE (AU, AL). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 4, с. 520–525.
- Бахмина К.Ю., Калегаев В.В. Моделирование эффекта частичного кольцевого тока в возмущенной магнитосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 6, с. 770–779.
- Бороев Р.Н., Васильев М.С. Связь ASY-H с параметрами межпланетной среды и авроральной активностью на главных фазах магнитных бурь во время CIR и ICME событий. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 1, с. 43–50. DOI: [10.12737/szf-61202004](https://doi.org/10.12737/szf-61202004) / Boroyev R.N., Vasiliev M.S. Relationship of the ASY-H index with interplanetary medium parameters and auroral activity in magnetic storm main phases during CIR and ICME events. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 35–40. DOI: [10.12737/stp-61202004](https://doi.org/10.12737/stp-61202004).
- Калегаев В.В., Бахмина К.Ю., Алексеев И.И. и др. Асимметрия кольцевого тока во время магнитной бури. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 6, с. 780–792.
- Макаров Г.А. Геометрический фактор в сезонных вариациях среднесуточных значений геомагнитного индекса Dst. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 4, с. 59–66. DOI: [10.12737/szf-64202008](https://doi.org/10.12737/szf-64202008) / Makarov G.A. Geometric factor in seasonal variations of daily average values of the geomagnetic index Dst. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 4, pp. 50–56. DOI: [10.12737/stp-64202008](https://doi.org/10.12737/stp-64202008).
- Макаров Г.А. Смещения значений геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 3, с. 31–38. DOI: [10.12737/szf-73202103](https://doi.org/10.12737/szf-73202103) / Makarov G.A. Offset in the geomagnetic indices of the magnetospheric ring current. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 29–35. DOI: [10.12737/stp-73202103](https://doi.org/10.12737/stp-73202103).
- Макаров Г.А. Геомагнитные индексы ASY-H и SYM-H и их связь с межпланетными параметрами. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 4, с. 38–45. DOI: [10.12737/szf-84202203](https://doi.org/10.12737/szf-84202203) / Makarov G.A. Geomagnetic indices ASY-H and SYM-H and their relation to interplanetary parameters. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, iss. 4, pp. 36–43. DOI: [10.12737/stp-84202203](https://doi.org/10.12737/stp-84202203).
- Макаров Г.А. Крупномасштабные связи геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H с северо-южной компонентой ММП и бета-параметром солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 97–103. DOI: [10.12737/szf-103202411](https://doi.org/10.12737/szf-103202411) / Makarov G.A. Large-scale relationships of the geomagnetic indices SYM-H and ASY-H with the north-south IMF component and the solar wind beta parameter. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 91–96. DOI: [10.12737/stp-103202411](https://doi.org/10.12737/stp-103202411).
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A4, pp. 7737–7747. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).
- Bhaskar A., Vichare G. Forecasting of SYM-H and ASY-H indices for geomagnetic storms of solar cycle 24 including St. Patrick's day, 2015 storm using NARX neural network. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2019, vol. 9, no. A12. DOI: [10.1051/swsc/2019007](https://doi.org/10.1051/swsc/2019007).
- Haiducek J.D., Welling D.T., Ganushkina N.Y., et al. SWMF Global Magnetosphere Simulations of January 2005: Geomagnetic indices and cross-polar cap potential. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1567–1587.
- Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., et al. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A2, p. 1060. DOI: [10.1029/2002JA009428](https://doi.org/10.1029/2002JA009428).
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. *Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (Provisional) No. 1: 1989–1990*. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism; Kyoto University, Japan, 1992, 240 p.
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., et al. *Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM for 2009 (Provisional)*. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism; Kyoto University, Japan, 2010. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf> (дата обращения 5 октября 2021 г.).
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A4, pp. 7697–7704.
- Namuun B., Tsegmed B., Li L.Y., Leghari G.M. Differences in the response to CME and CIR drivers of geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, no. 2, pp. 35–40. DOI: [10.12737/szf92202304](https://doi.org/10.12737/szf92202304) / Namuun B., Tsegmed B., Li L.Y., Leghari G.M. Differences in the response to CME and CIR drivers of geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 31–36. DOI: [10.12737/stp-92202304](https://doi.org/10.12737/stp-92202304).
- Shi Y., Zesta E., Lyons L.R., et al. Statistical study of effect of solar wind dynamic pressure enhancements on dawn-to-dusk ring current asymmetry. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A10216. DOI: [10.1029/2005JA011532](https://doi.org/10.1029/2005JA011532).
- Singh A.K., Sinha A.K., Pathan B.M., et al. Effect of prompt penetration on the low latitude ASY indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 94, pp. 34–40.
- Takalo J., Mursula K. A model for the diurnal universal time variation of the Dst index, *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, no. A6, pp. 10905–10914.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03208. DOI: [10.1029/2004JA010798](https://doi.org/10.1029/2004JA010798).
- Weygand J.M., McPherron R.L. Dependence of ring current asymmetry on storm phase. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A11221. DOI: [10.1029/2006JA011808](https://doi.org/10.1029/2006JA011808).
- Zhao M.X., Le G.M., Lu J.Y. Can we estimate the intensities of great geomagnetic storms ($\Delta SYM-H \leq -200$ nT) with the Burton equation or the O'Brien and McPherron equation? *Astrophys. J.* 2022, vol. 928, p. 18. DOI: [10.3847/1538-4357/ac50a8](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac50a8).
URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 29 марта 2025 г.).
URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 29 марта 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Макаров Г.А. Влияние межпланетных параметров на показатель степени симметрии кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 36–41. DOI: [10.12737/szf-113202504](https://doi.org/10.12737/szf-113202504).